存在と認識にまたがる因果性の解釈とその応用

鷲尾 隆
（株）三菱総合研究所　安全工学研究部　安全工学室
１９９１年２月２１日　京都大学基礎物理研究所主催
「不可逆な多体系への統計物理及びその周辺分野からのアプローチ」研究会発表

１．はじめに

筆者は、従来の物理的因果性概念の拡張と、それに基づく新しい物理的対象の記述・取扱いの方法を模索している。研究の最終目的は、これらの成果により、原子力プラントや宇宙船に代表される大規模物理プロセスの計測・制御・診断等の分野における従来の限界を克服することにある。

以下の本文では、まず、第２章において、従来の物理的な因果律の概念を用いるだけでは取扱いが困難な問題の例を示し、次に第３章において必要な物理的因果性概念の拡張に関する背景哲学を述べる。そして、第４章において拡張された物理的因果性概念に基づく、物理系の因果構造の導出方法に関し詳述する。そして、第５章において、得られた概念及び手法の応用に関する展望を述べることとする。

２．物理的因果性概念の拡張が必要な問題例

ここで、図１に示す原子力プラントの蒸気発生器において、幾つかの主要な物理変量の正常値からの変位を計測することにより、この機器において、変位の原因となる異常が存在すると考えられる物理的機構を診断することを考える。

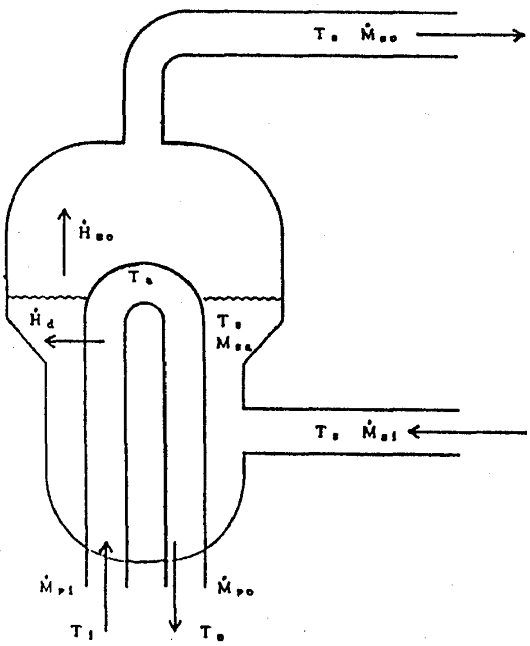


図１　原子力プラントの蒸気発生器

この体系は大規模プラント等で用いられる蒸気発生器の一般的構造を持っている。蒸気発生器の2次側チャンバーの中を逆U字形に高温の1次加熱水が流れ、低温の2次冷却水を加熱する。チャンバーの下部プレナムの右側からは2次側冷却水が流れ込む。この体系では、2次側冷却水は、蒸気発生器に流入する前に予め飽和温度（沸点温度）に達しているので、2次側冷却水は1次側から加熱を受けると直ちに蒸気となり、上部プレナムの右側から流出していく。従って、2次側チャンバーの中には2次冷却水の液体状態と気体状態が併存する。1次側から2次側への加熱は、主に逆U字管が2次側冷却水の液相部と接している部分で起こる。即ち、液相の2次側冷却水の量が多い程、1次側から2次側への熱移動が起こる逆U字管の表面積は大きくなるので、移動熱量は増加する。

このような体系について、幾つかの主要な物理変量の計測変位情報から、異常な物理的機構の部分を同定するためには、図2に示すようにこの体系において定義される各物理変量間の変化の依存関係が判らなければならない。ここでは、各変量の定義の詳細な説明は省略する。このような変量間の変位伝搬経路を表す有向グラフ（因果構造グラフ）を用いることにより、我々がこの体系内のある変量に外乱を観測した場合、この有向グラフを逆に辿り、グラフ上のどの部分、或いはどの変量の境界条件の変化が、体系に外乱をもたらしたかを推定できる。

例えば、1次加熱水出口温度T_oを監視していて、異常な変位を観測したとする。この変量に影響を与える他の変量をグラフ上で逆に辿ると、すべての変量に到達できる。従って、このT_oの監視で蒸気発生器の動作に対する可能なあらゆる物理的外乱の何れかを検知していることが解る。ここで、1次加熱水出口の流速V_{po}も監視していたとし、この変量にも異常変位が観測されていたとする。この変量はグラフ上の点線で囲まれた、1次側入り口出口の質量流量$\dot{M}_{pi}$、$\dot{M}_{po}$、入り口の流速V_{pi}、流路断面積A_d、加熱水の密度Q_pにのみ影響を受けることが解る。従ってV_{po}の監視によって、T_oで検知された異常について、その外乱が加えられた可能性のある物理的機構を限定できることが解る。このような異常な物理的機構の限定情報が得られれば、それとこの部分の可能異常モードの知識から、逆U字間の破断による1次加熱水の2次側への漏洩等の具体的異常原因を推定できる。

図2に示す変量間の変位伝搬経路の一方向性は、従来の古典物理学における時間的決定性の要求としての因果律のみで構成されてはいない。例えばグラフ上の一点鎖線で囲まれた部分は、1次加熱水の入口における温度T_{pi}及び質量流量$\dot{M}_{pi}$、熱流量$\dot{H}_{pi}$、比熱容量係数Cの間の関係を表す比熱容量の法則であるが、この法則は時間積分等の時間的決定性を含まないにもかかわらず、図に示すような経路の一方向性を仮定しないと実際の変位の伝播を説明できない。一方で、このように詳細な各物理法則レベルにまで分解した変量間の関係を考えるのではなく、これら変量とその関係式を代入消去により、数本の微分または積分方程式にまとめたモデルを得ることは可能である。そのようなモデルでは変量間の変化の関係は、全て時間的決定性としての因果律に従う。しかしこれでは、図2に示すような代入消去される以前の、中間的変量間に成り立つ詳細な物理法則や物理的機構に関する異常診断はできなくなってしまう。従って、このような物理系の観測変位に基づく異常原因の診断問題では、従来の物理的因果律の概念のみでは不十分であることが解る。

なお、ここで取り上げた具体例の詳細については、別著を参照されたい。(1)

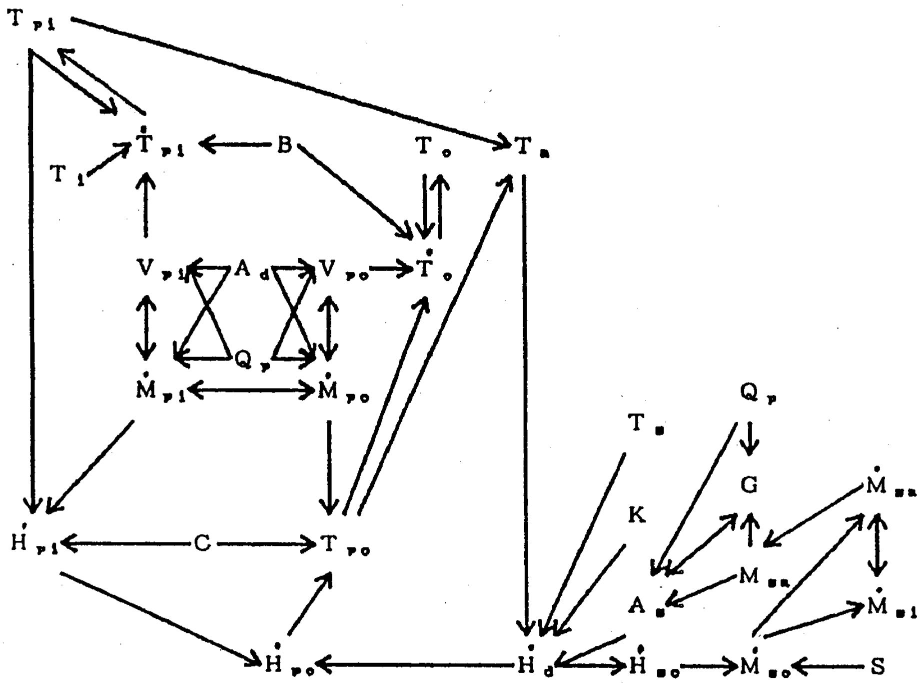


図２　蒸気発生器の因果構造

３．物理的因果性概念の拡張に関する背景哲学

ここでは、従来の時間的決定性の要求としての物理的因果律の概念のみでは不十分な上述のような問題の解決を目的とする、新たな拡張された物理的因果性概念を得るために、背景となる考え方を述べる。

物理学において因果律が重要な基礎概念であることは言うまでもないが、その定義を巡っては昔から多くの学者の間で様々な議論が行われてきた。しかし今日では、古典物理学における決定論の要求としての因果律の定義に関しては大方の合意がえられ、ヴォルフガング・パウリによれば、それは

”ある個数の物理量（結局それは連続的な空間の関数）の時刻$t=t_0$における知識から（その知識は測定によって原理的には任意の精度で獲得されうるものであり）、この状態量の他の時刻$t=t_1$（t_0より早くても遅くてもよい）における値を計算して、$t=t_1$に対する他のすべての可能な測定結果を正確に予言できること。”(2)

である。この定義は、

”明晰かつ判明に我々の心に現れるもののほかは、何ものをも我々の判断に取り入れぬということ。”(3)

という近代物理学の大原則に従い、極力、明確に測定可能な物理量によって定義される状態間の決定関係として因果律を捉えようとするものでる。

しかしながら、古典物理学の範疇でさえこの因果律の定義が簡単には適用できない対象が多数存在する。例えば図３（ａ）に示すように、抵抗体に電流が流れる場合を考える。この体系を微視的に見ると、これは図３（ｂ）のように抵抗体物質の分子の間を電子が衝

突・散乱しながら移動していく過程である。電子と分子の衝突や散乱は時間を陽に含む方程式で表されるから、個々の微視的現象については上記の因果律の定義を適用した議論ができる。一方、巨視的にはこの体系の挙動はオームの法則で表されるが、これは電子と分子の衝突・散乱の時間的・空間的な統計平均をとったものである。個々の微視的因果律も平均化されおり、陽に時間を含んでいないので、巨視的レベルで因果性を議論しようとしても、時間を含む上記の因果律の定義は適用できない。

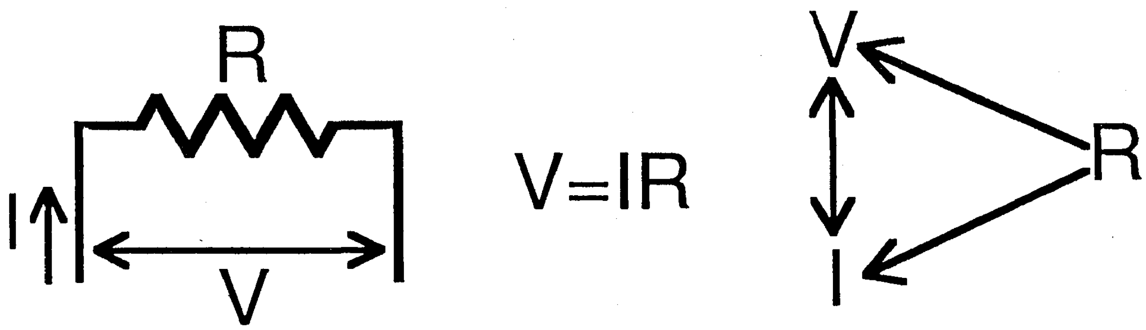
しかし、だからといってこの巨視的レベルで物理量や状態間の因果性を議論することが無意味であるとは考えられない。ここで、因果性を

”複数の物理量の間で、ある量の値から他のある量の値が物理的に決まる関係”

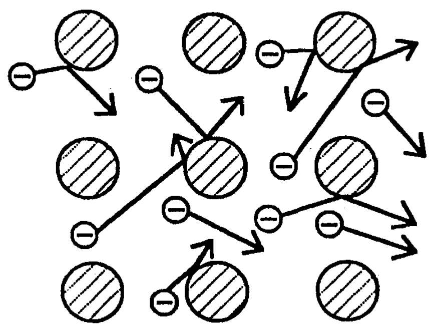
または

”複数の物理量の間で、値の変化が物理的に伝播する方向関係”

というより広い意味に定義し直すならば、上記の巨視的レベルのオームの法則においても物理量間の因果性の議論は可能である。例えば、抵抗体の両端に電圧Ｖを印加すれば電流Ｉが決まる。また電流Ｉを流せば両端に電圧Ｖが発生する。しかし、抵抗値Ｒの温度依存性を別にすれば、オームの法則が表す物理現象の範囲では、ＶやＩによってＲが物理的に決定されたり変化させられることはない。従って、図３（ａ）の右端に表したような物理量間の因果性を考えることが可能である。



（ａ）巨視的レベルでの記述



（ｂ）微視的レベルでの記述

（より微視的レベルでは時間的な因果性に還元されるが、着目する巨視的レベルでは直接には時間と関係付けられない因果性）

図３　抵抗値Ｒ・両端電圧Ｖ・電流Ｉの抵抗体

次に、このような時間に直接依存しない拡張された因果性の定義が、物理学の方法論の枠組みにおいてもつ意義を考察する。アイザック・ニュートンは、自然科学とは自然という書物を読み内容を把握することであると述べたと言われる。文献の意味を全体として把握するためには、個々の単語や文章の意味を理解すると同時に、文献に書かれている以外のいわゆる常識的知識を用いて意味をまとめあげることが必要である。このようにして文献全体の意味を把握する方法は、文学者の間で解釈学と呼ばれている。そして、文献理解のために用いられるこれらの単語や文法及び世界についての常識の知識のことを、解釈学では先行的理解という。前出のヴォルフガング・パウリは、

”自然を理解する過程を（人間が理解、すなわち新しい認識を獲得したときに感ずる大きな喜びと同様に）人間の魂の中にあらかじめ存在する内的な表象と外的な対象が重なり合うことおよびそれらの関係として解釈する”(2)

”物理学のおのおのの領域は固有の先験的仮定をそれ自身の中にもっている。”(2)

と述べ、物理学もまた各分野毎に、物理量やその間の関係を表す物理法則、及び世界常識に関するそれぞれ固有の先行的理解を基礎に持ち、広い意味での解釈学であるという。このような観点に立つと、前述の抵抗体の例において微視的レベルでは成立した時間に基づく因果律の定義や解釈が、巨視的レベルでは通用せず別の定義による因果性の解釈が可能である理由が解る。２つの視野はそれぞれ異なる先行的理解に基づいており、一方の因果性の解釈を他方にそのまま移入することは許されないのである。

これでも尚、前述の時間に直接依存しない因果性の定義は飽くまで人間の認識上の因果性の解釈でしかない、と考える余地は残されている。しかしながら、ニールス・ボーアは観測者と被観測体の間の量子力学的な相互作用の不確定性（相補性）を論じた後で、観測者を解釈主体（我々）、被観測体を解釈客体（物理系）に置き換えて、

”一方においてわれわれの思考活動を記述しようとすると、客観的に与えられた内容と観測する主体の間の対比を要求することになる。他方において客体と主体のあいだの厳格な区分は堅持されない。なぜなら後者の概念もまた思考内容に属しているからである。”(4)

と述べている。また、ヴォルフガング・パウリも

”物理学の中での相補性に関するこれらの事態は、当然物理学という狭い領域を超えて人間的な認識の一般的な条件に際しての類似した状況につながっている。・・このように現代物理学は一方において認識する主体、他方において認識される客体の対立を、観測者（あるいは観測手段）と観測される系の間に切断をいれるという考えに拡張するものである。・・意識はまさに（そもそもその存在が論理的必然であるところの）主体と客体のあいだの切断を要求するが、一方では切断の位置はある程度まで任意的なものである。”(2)

と述べ、素粒子の運動量を測定しようとすれば波動として観測され、また位置を測定しようとすれば粒子として観測されることに対比して、この切断の位置を観測者の領分を小さくする所におけば実在主義となり、逆に大きくする所におけば観念主義になると述べている。これらの議論を受けて、先ほどの時間に直接依存しない拡張された因果性の定義が、人間の認識上の因果性の解釈に過ぎないのであるか否かという問題に立ち戻って考えてみることができる。各物理法則について、デカルト流に明晰かつ判明に測定することが可能な各物理量間の定量的関係を対象にする場合には、それは誰の目にも明かであり切断の遙か客体側にあるため、いわゆる客観的な議論が可能である。一方、直接測定することが困

難な各物理法則の持つ拡張された因果性の解釈は、明晰、判明なものではなく我々の先行的理解に大きく依存する。しかし、これらの解釈は現象の理解・説明にとって非常に有用であり、物理学の目的が自然現象の理解・説明であるからには、物理的に意味のあるものである。このような因果性の解釈は主体と客体の切断の境界付近にあると考えられる。

次に我々のこのような拡張された物理的因果性に関する理解の、より詳細な内容を考察する。我々がある物理系の変量間の因果性を理解しようとする場合、各種変量とそれらに関する各物理法則式という知識表現によって物理系を記述し、変量間の因果関係に関する理解を行う。この場合の記述という行為は、我々があらかじめ定義した各種変量、それらの間に仮定される各物理法則、およびそれら法則の適用条件や定量的、因果的関係に関する仮定などの先行的理解に基づいていると考えられる。これら先行的理解に基づき、系に関して我々が問題にする側面が解釈され一定の知識表現のなかに記述される。したがって、系を記述する物理法則式上で変量間の因果関係に関する理解を行う場合には、我々はこれら法則に関する仮定を用いると考えられる。このような物理的系の解釈において扱われる因果性には、田中らの分類に従い以下の３種類があると考える[5]。

一つは「外的駆動型因果性」と呼ばれるものである。方程式表現において境界条件となる変量を操作することにより、系の状態を変化させることができる。この場合、その系の変化にとって原因は外生的であると考えられる。このような外生的変量のもつ外的駆動性によって系の因果構造が決定されるという立場から、Iwasaki およびSimon は因果的順序付け(causal ordering)の理論を提唱した[6]-[8]。彼らの理論においては、系内の各物理的機構を表現する構造方程式の構築と外生的変量の指定によって系の因果構造(causal structure)や架空の因果性(mythical causality)[7][9]が導出される。

一方、微分方程式や時間遅れ方程式で記述される系では、各変量の時間微分や時間遅れが系を自ら変化させていくと見なすことができ、時間の観点から因果性を定義することができる。これは「内的発展型因果性」と呼ばれる。物理学や de Kleer らの定性推論[9]ではこのような系の内的展開力に基づく時間的因果性が主に扱われる。

また、電気回路における抵抗体の温度依存則のように、同時的な事象間において我々の理解では一方的依存性が見られる場合がある。このような我々の理解における機能的関連に基づく因果性は「機能関連的因果性」と呼ばれ、de Kleerらの定性推論でも一部扱われる。

我々が物理法則式上で変量間の因果関係に関する理解を行う場合や、Iwasaki および Simon の因果的順序付けにおいて外生的変量を指定したり構造方程式を構築する場合には、系の外的駆動型因果性に加えて系の内部の各物理法則の仮定である適用条件、定量的関係および内的発展型、機能関連的因果性の先行的理解が統合的に用いられると考えられる。

４．物理系の因果構造の導出

ここでは、物理法則式に基づく我々の対象理解における、上記３種類の因果性の関係を明らかにし、更に、各物理法則の適用条件、定量的関係、内的発展型因果性、及び機能関連的因果性に関する仮定から、系の外的駆動型因果性に関する知識と系の因果構造を導出する方法論の構築を試みる。

我々がある物理系を理解の対象にする場合、対象系がある物理法則の適用条件を満たす

場合にのみ、その法則は対象の理解において意味をもつ。筆者は各法則の適用条件が満たされる限り、その法則の因果性に関する仮定は、その定量的関係と同様に一般性をもって対象の理解に適用できると予想した。その予想に基づき各物理法則固有の内的発展型および機能関連的因果性に関する知識を抽出し、それらを定量性の知識とともに方程式上に統合的に記述する方法を確立した。更にそれにある種の代数的規則を適用することで、系の外生的変量候補（境界条件を与える変量の候補）の同定と因果構造の導出を行った。なお、以下の議論のより詳細な説明は別著を参考にされたい。[10]

４．１　各物理法則固有の因果的仮定の抽出

前述のとおり、各物理法則はその背後に、その法則の適用条件のもとで成立する因果性に関する仮定をもつ。しかし、それらは暗黙の仮定であり従来の定量的物理法則式には陽に記述されてはいない。物理的系全体のなかで定まる因果性を導出するための一般的ヒューリスティクスは、de Kleer らの定性推論[9]や Williams によるＴＱ解析[11]に関する研究において提唱されてきた。本節ではこれらとは異なる観点から、一つの物理法則内においてその適用条件のもとで成立する一般的な因果性の仮定を抽出するために、具体的対象に依存しない有用な６つのヒューリスティクスをまとめる。

因果性の仮定が最も明瞭なのは法則が内的発展型因果性を表す場合である。

Ｈ１：変量群$\dot{X}$とその変量群自身の時間積分Ｘとの関係を表す法則のなかでは
Ｘは$\dot{X}$に一方的に依存する。

ここで変量群Ｂが変量群Ａに一方的に依存するとは、単一法則のなかで変量群Ａ内の任意の変量の変化が他の変量群Ｂ内の任意の変量の変化を引き起こす可能性があるが、Ｂ内の任意の変量の変化はＡ内のいずれの変量の変化を引き起こすこともこの法則のなかではあり得ないということである。このヒューリスティックはＴＱ解析のフィードバック方向付けヒューリスティックと同じである。例えば、キャパシタンスでの電流Ｉと蓄電電荷Ｑの関係ではＱがＩに一方的に依存する。

$$Q = \int_{-\infty}^{t} I\,dt \qquad (Q \leftarrow I) \qquad (1)$$

Ｈ２：変量群Ｘ（ｔ）と時間遅れ変量群Ｙ（ｔ＋Δｔ）との関係を表す法則では
Ｙ（ｔ＋Δｔ）はＸ（ｔ）に一方的に依存する。

これは本質的にはヒューリスティックＨ１と同じである。例えば、パイプ内の層流という条件で成立する水流の温度輸送法則では、下流の温度$T_d(t+\Delta t)$は上流の温度$T_u(t)$に一方的に依存する。

$$T_d(t+\Delta t) = T_u(t) \qquad (T_d(t+\Delta t) \leftarrow T_u(t)) \qquad (2)$$

法則が内的発展型因果性に直接関係しなくとも機能関連的因果性を表し、変量間の依存関係が非対称であると見なされる場合は数多く存在する。

Ｈ３：法則が表す対象の属性量群と状態量群の間には一方的依存関係が見られる。
依存の向きは我々の現象理解の一般的知見に基づき決められる。

属性量群と状態量群の間の依存性の向きは、各法則に関する一般的な経験的知識によって具体的対象に依存しないで決定される。このヒューリスティックは de Kleer の提唱する導管ヒューリスティックに関係している。オームの法則は抵抗体の属性量である抵抗Ｒが有限の値をもつという条件で、Ｒと状態量である電圧Ｖ，電流Ｉの関係を表す。我々の

一般的理解としてこの法則で記述される機構のみでは、RとIを変えてVを変化させたりRとVを変えてIを変化させることはできても、VとIによってRを変化させることはできない。

$$V = IR \qquad (V,\ I \leftarrow R) \qquad (3)$$

ダイオードの抵抗は電圧依存性をもつが、Rが有限値をとる限り、我々は一般にこの現象をオームの法則と切り離して、属性量である抵抗の状態量である電圧に関する依存性法則として扱う。

$$R = f(V) \qquad (R \leftarrow V) \qquad (4)$$

H４：二つの問題領域にまたがる関係を表す法則では、一つの問題領域に属する変量群が他の問題領域の変量群に一方的に依存する。依存の向きは我々の現象理解の一般的知見に基づき決められる。

一つの問題領域とは、我々のある現象理解において単一と見なし得る物理的現象を問題にする物理学領域のことである。例えば、電気回路解析は、巨視的理解における回路内の電子流という単一現象を問題にする。また、熱力学は物質を媒体とする巨視的な熱流という単一現象を問題にする。また、このヒューリスティックにおいても依存性の向きは、各法則についての一般的な経験的知識により具体的対象に依存しないで決定される。一様物質の抵抗体という条件のもとで、電気回路解析の変量である電圧Vと電流I、および熱力学の変量である発熱率$\dot{H}$の関係はジュールの法則によって表される。この法則は一般に非可逆過程を表し、HはVとIに一方的に依存する。

$$\dot{H} = VI \qquad (\dot{H} \leftarrow V,\ I) \qquad (5)$$

H５：同種変量のみを含む変量群内の収支に関する法則では、依存関係はすべて双方向的である。

ここでの双方向的依存関係とは単一法則内の変量群のなかで、任意の一つの変量の変化が他の任意の変量の変化によって引き起こされる可能性があることである。このヒューリスティックは de Kleer のコンポーネントヒューリスティックに関係している。非圧縮性流体という条件で成立する１本のパイプ内水流の物質収支の法則では、質量流入率$\dot{M}_i$と質量流出率$\dot{M}_o$の間の依存関係は双方向的である。

$$\dot{M}_o = \dot{M}_i \qquad (\dot{M}_o \leftarrow\rightarrow \dot{M}_i) \qquad (6)$$

H６：ある法則１において変量群X，Y間の依存関係が明確でないとき、変量群Xに関する我々の現象解釈においてつねにXを変化させる他の法則群Gが用いられるとする。この場合、法則１においてはXからYへの一方的依存関係を定める。

熱伝導の法則は空間内の異なる２点a-b間の熱伝導係数Kが有限である条件のもとで成立する。この法則では２点間の温度差をΔT、熱流量を$\dot{H}$としたとき、ヒューリスティックH３より$\dot{H}$およびΔTはKに一方的に依存すると考えられる。ところで、熱伝導の法則は物理的系の記述において通常以下の法則群と一緒に使われる。

$$H_a = \int_{-\infty}^{t} -\dot{H}\,dt, \quad H_b = \int_{-\infty}^{t} \dot{H}\,dt,$$
$$T_a = H_a/(C_a M_a), \quad T_b = H_b/(C_b M_b), \qquad (7)$$
$$\Delta T = T_a - T_b$$

熱伝導の法則において、ΔTが$\dot{H}$から変化を受けるとすると、$\dot{H}$の変化は系内で熱伝導の法則以外の法則群(7)中の二つの時間積分のいずれかによって引き起こされるか、または

外生的原因によって引き起こされることになる。前者の場合はヒューリスティックＨ１と矛盾する。後者の場合、ΔＴを変化させる機構が熱伝導の法則と法則群(7)の二つに分かれ、どちらによってΔＴが変化するのかわからない。熱伝導の法則は法則群(7)とつねに一緒に使われるため、この法則ではつねに$\dot{H}$がΔＴに一方的に依存すると解釈することが妥当である。

$$\dot{H} = K \Delta T \qquad (\dot{H} \leftarrow \Delta T,\ K) \qquad (8)$$

これに対し、さきに述べた電気回路のオームの法則は同じく流れの法則であるが、通常我々は電子の流れを非圧縮性であり瞬間に伝わるものと見なす。そのため、配線浮遊容量の電圧に関する法則群をつねに用いるとは限らず、式(3)の解釈が妥当である。de k-leerの導管ヒューリスティックではある物理法則の因果性の解釈において他の法則群の干渉を考えないため、このような区別は起こらない。

各ヒューリスティックは具体的対象に依存しないため、導かれた因果的仮定は各物理法則に固有なものでさまざまな対象に対して一般性をもつと考えられる。ただし、これらはあくまでもヒューリスティクスであるため、例外的な場合は存在し得ると考える。

４．２　各物理法則の定量的および因果的仮定の知識表現

物理法則に関する知識としては前節に述べた因果的仮定のほかに、重要なものとして変量間の定量的関係がある。我々は各法則に関するこれら定量的および因果的仮定を統合的に扱い、系内の現象を解釈したり外生的変量の指定や構造方程式の構築を行うと考えられる。そこで本節では、方程式における変量間の定量的関係と因果的仮定を統合する知識表現方法を述べ、それによる物理法則の記述を考える。

ある方程式１とそれに含まれるすべての変量の集合を考える。その方程式においてある変量群X_1からそれ以外すべての変量の群Y_1への一方的依存性が仮定されるとする。Y_1はつねに空でないとする。同種変量間の収支法則のように変量間に一方的依存性が認められない場合は、すべての変量をY_1に組み入れX_1を空集合とする。このとき、方程式における変量間の関係を以下の形式に表す。

$$\begin{array}{lll} \text{if} \quad X_1 \neq \{\phi\} & \text{then} & G_1(Y_1) = F_1(X_1) \\ \text{if} \quad X_1 = \{\phi\} & \text{then} & G_1(Y_1) = 0 \end{array} \qquad (9)$$

ただし、$X_1 \cap Y_1 = \phi, \quad Y_1 \neq \phi$

ここで、F_1, G_1は方程式１のそれぞれ右辺、左辺を表す。このように一つの方程式において、左辺の変量が右辺の変量に一方的依存性をもつように各変量を配置して定量的関係を表した方程式を「仮定構造方程式」と呼ぶことにする。

この定義に従って前節で述べた各法則を表す方程式を記述すると、以下のようになる。

時間積分	：	$Q = \int_{-\infty}^{t} I\,dt$	(1)'
時間遅れ	：	$T_d(t + \Delta t) = T_u(t)$	(2)'
オームの法則	：	$V / I = R$	(3)'
抵抗電圧依存性の法則	：	$R = f(V)$	(4)'
ジュールの法則	：	$\dot{H} = VI$	(5)'
物質収支の法則	：	$\dot{M}_i - \dot{M}_o = 0$	(6)'
熱伝導の法則	：	$\dot{H} = K \Delta T$	(8)'

これら各法則に関する仮定構造方程式は法則内変量間の一般的な定量的かつ因果的知識を含んでいると考えられる。後に示すように、この知識表現にある種の代数的規則を施すことによって、法則群が表す系の外生的変量の候補や可能なすべての外的駆動型因果構造、架空の因果性、系内の変量間の外的駆動型因果性の知識を有する種々の方程式等を導くことができる。

4．3　外生的変量候補と因果構造の導出

ある物理系を表す適当な仮定構造方程式群Lが与えられ、そのなかの全ての変量の集合をSとする。これら仮定構造方程式上での我々の理解において、L内のある仮定構造方程式 l の左辺の変量が1個のみの場合、この変量の変化は方程式 l において右辺の全ての変量の変化により一意に定まると考えられる。そこで仮定構造方程式 l において変量群 Y_l の要素が1個のみの場合、その要素を決定変量、その方程式を決定方程式と呼ぶ。この時、その系の外的駆動型因果性の知識を導出するアルゴリズムを図4に示す。

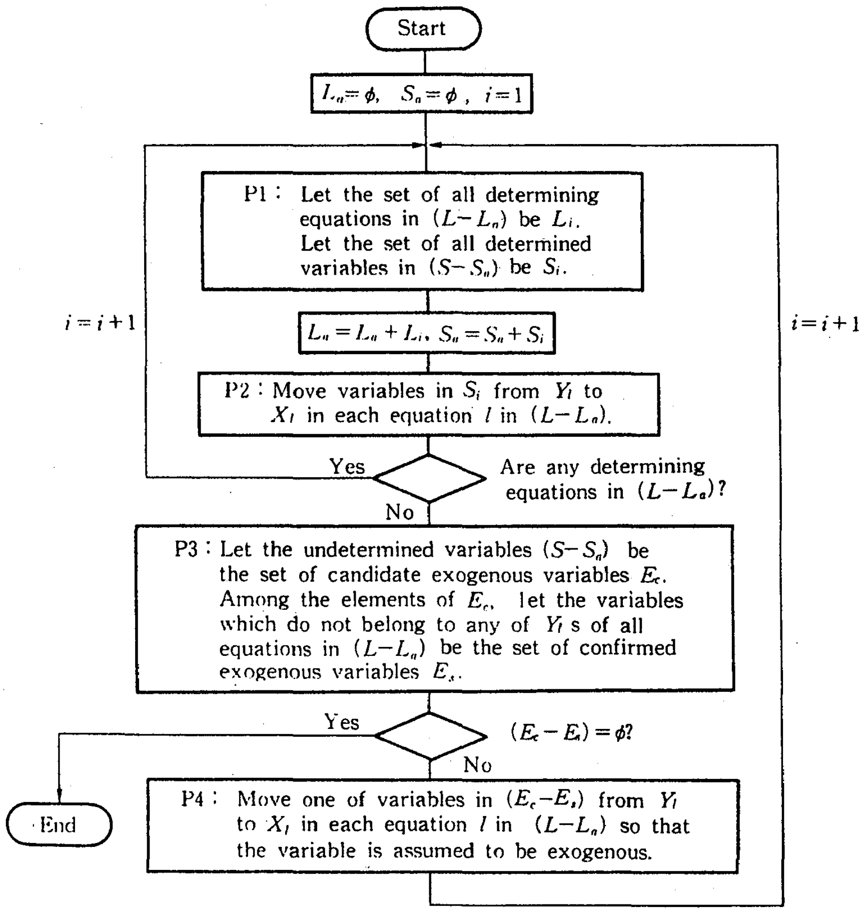


図4　系の外生的変量候補と因果構造を導出するアルゴリズム

このアルゴリズムによる導出を、図５に示す気体ピストンシンリンダを例に取り、具体的に説明する。これは前述のSimonが因果的順序付けの説明において用いた例である[6]。

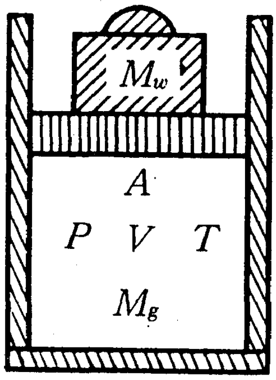


図５　気体ピストンシリンダ

この系のモデルは以下のとおりである。

重力の法則	：$F = gM_w$	［Ｈ３］	（９）
力－圧力の関係	：$F/P = A$	［Ｈ４］	（１０）
ボイル・シャルルの法則	：$PV = kM_gT$	［Ｈ３，Ｈ６］	（１１）
位置エネルギーの法則	：$E_p/V = P$	［Ｈ６］	（１２）
比熱容量の法則	：$Q/T = cM_g$	［Ｈ３］	（１３）
エネルギー保存の法則	：$E - E_p - Q = 0$	［Ｈ５］	（１４）

分銅の質量：M_w，ピストンの面積：Ａ，分銅の気体に及ぼす力：Ｆ，気体のエンタルピー：Ｅ，気体の圧力、体積、温度、質量：Ｐ，Ｖ，Ｔ，M_g，気体のポテンシャルエネルギー，内部エネルギー：E_p，Ｑ，重力加速度：ｇ，気体定数：ｋ，気体の比熱係数：ｃ

大かっこ［］内には各法則の因果的仮定の抽出において用いられたヒューリスティックの番号を示した。ボイル・シャルルの法則では、M_gは気体の属性量であるため、ヒューリスティックＨ３より式の左辺にくる。また、我々の理解ではＰ，ＶからＴへの影響はつねにエネルギー保存則によって表される。したがって、ボイル・シャルルの法則ではＴはヒューリスティックＨ６より式の右辺にくる。位置エネルギーの法則では力や圧力はつねに他の物理的機構によって与えられると考えられるので、ヒューリスティックＨ６よりＰは式の右辺にくる。

この例ではＬ＝｛(9)，(10)，(11)，(12)，(13)，(14)｝，Ｓ＝｛M_w，Ａ，Ｆ，Ｅ，Ｐ，Ｖ，Ｔ，M_g，E_p，Ｑ｝である。このなかで決定方程式は（９）のみなので、手続きＰ１においてL_1＝｛(9)｝，S_1＝｛Ｆ｝となる。（$L - L_1$）＝｛(10)，(11)，(12)，(13)，(14)｝のなかでS_1に属する変量を左辺にもつのは（１０）だけなので、手続きＰ２において（１０）を以下のように変形する。

$$P = F/A \qquad (10)$$

次に $(L-L_1)$ = {(10), (11), (12), (13), (14)} のなかで決定方程式となるのは（10）だけなので、手続きP1に戻り、L_2= {(10)}, S_2= {P} とする。以下同様に、

$$V = kM_gT/P \qquad (11) \rightarrow (L_3 = \{(11)\},\ S_3 = \{V\})$$

$$E_p = PV \qquad (12) \rightarrow (L_4 = \{(12)\},\ S_4 \{E_p\})$$

$$E - Q = E_p \qquad (14)$$

となる。$(L-L_1-L_2-L_3-L_4)$ = {(13), (14)} のなかにもはや決定方程式は存在せず、P1とP2の反復を終える。決定されなかった変量群 $(S-S_1-S_2-S_3-S_4)$ = {M_w, A, E, T, M_g, Q} は手続きP3において外生的変量候補群E_cとなる。さらに、同じくP3において，E_c中の {M_w, A, M_g} は $(L-L_1-L_2-L_3-L_4)$ {(13), (14)} のいずれの方程式の左辺の変量でもないので、外生的変量群E_sとして確定する。その他の変量 {E, T, Q} については、外生的変量の候補ではあるが確定しない。ここで、手続きP4に従い {E, T, Q} のいずれか一つを外生的変量と仮定する。この仮定の導入は一意的ではなく、{E, T, Q} 内の任意の変量を外生的変量として選択してよい。例えば、Eを系記述外部の法則で決定される外生的変量とする。式(14)のEを以下のように右辺に移項すると、

$$Q = E - E_p \qquad (14)$$

Qが決定して、L_5= {(14)}、S_5= {Q} となる。さらに、$(L-L_1-L_2-L_3-L_4-L_5)$ = {(13)} がS_5によって変形されて

$$T = Q/(cM_g) \qquad (13)$$

となり、L_6= {(13)}、S_6= {T} となって、因果構造の導出は完了する。この導出結果を図6（a）に示す。またP4まで戻ってTを外生的変量と仮定すると

$$Q = cM_gT \qquad (13) \rightarrow (L_5 = \{(13)\},\ S_5 = \{Q\})$$

$$E = E_p + Q \qquad (14) \rightarrow (L_6 = \{(14)\},\ S_6 = \{E\})$$

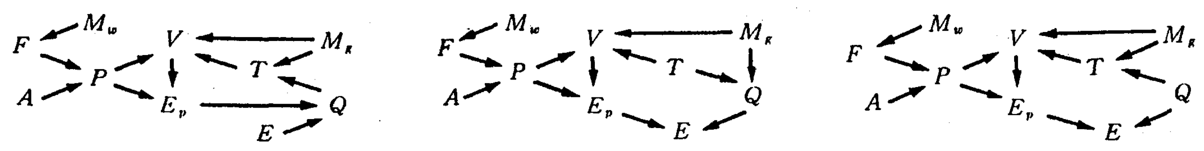
となり、図6（b）の因果構造が得られる。さらにまたP4まで戻りQを外生的変量と仮定すると

$$T = Q/(cM_g) \qquad (13)$$

$$E = E_p + Q \qquad (14)$$

となり、式（13），（14）が同時に決定してL_5= {(13),(14)}、S_5= {T, E} となる。したがって、図6（c）の因果構造が得られる。

図6（a）の因果構造は、シリンダが断熱壁である場合などのように、系のエンタルピーEが能動的に操作される場合に対応していると解釈できる。図6（b）及び（c）は、シリンダが外部から加熱されて中の気体の温度や内部エネルギーが直接操作される場合を表していると考えられる。このことは、一方でこの系の正常動作を妨げない範囲で我々が外乱を加えることのできる変量は、E_cのうちM_w, A, M_gとE_s= {E, T, Q} のうちどれか一つであることを表している。それ以外の変量に外乱を加えれば系内の幾つかの法則が制約過剰になり、もはや正常に動作しなくなることがわかる。したがって、図6の3つの導出結果は可能なすべての外的駆動型因果構造と同時に、平衡時の正常系における可能なすべての外乱の伝播、すなわち架空の因果性を表していると考えられる。



(a) Eを外生的変量と仮定　(b) Tを外生的変量と仮定　(c) Qを外生的変量と仮定

図６　気体ピストンシリンダについて導出された因果構造

以上、外生的変量候補、外的駆動型因果構造および架空の因果性を導出するための代数的規則を具体例とともに示した。いずれの導出結果も仮定構造方程式群で表される系モデルにとっては妥当なものであり、外部から操作または外乱を受ける系に対する我々の可能なすべての因果的解釈を表している。

5．応用への展望

ここでは、今まで述べてきた拡張された物理的因果性の概念と外生的変量候補（境界条件を与える変量の候補）及び因果構造の導出に関して、実際的問題への応用の展望について述べる。

物理プロセスの異常は、系外からの摂動（外乱）の印加という形で一般的に定式化できる。従って、プロセス内の幾つかの変量を監視し、その変動によってプロセスに外乱が入ったかどうか、即ち、正常動作をしているか否かを知ることができる。更に、プロセス内の異常を示す監視変量の種類と変位の大きさから、外乱の種類や強度を同定することが期待される。しかしながら、前述の気体ピストンシリンダの例にも示されるように、プロセスに許される外生的変量（境界条件を与える変量）の組み合わせは一意ではない。従って、異常原因によってはプロセスの外生的変量の種類が正常時とは異なって来ることも考えられる。例えば、電圧制御電源（定電圧電源）に接続された抵抗体の外生的変量の一つは電圧Ｖだが、電源の故障によって電流Ｉが外生的変量に取って代わり、抵抗体に外乱を印加することが考えられる。しかも、外生的変量が異なることによって、系内の各変量によって観測できる外生的変量の種類も異なってくる。例えば、気体ピストンシリンダでＱを監視する場合、Ｅが外生的変量の場合には

$$Q = cE/(c+k) \qquad (15)$$

より、Ｅの変動のみを同定可能であるが、Ｔが外生的変量の場合には

$$Q = cM_gT \qquad (16)$$

となり、ＴとＭｇ双方の変動の同定が可能となる。外乱は常に外生的変量の幾つかを介して系に印加されるから、このような外生的変量（系の境界条件）の交代と、それによる外乱同定能力の変化の可能性は、診断において充分に考慮されねばならない。

このような考察によって、外乱の原因や印加パターンに関する情報が事前には得られない状況で、物理プロセス内の幾つかの監視変量の情報だけから、外乱の同定（診断）を行うという一般的な場合を考えると、プロセス内の物理法則の定量的関係の知識を用いるだけでは不十分であり、前述の因果構造導出によって導かれる、系の境界をなす外生的変量の可能な組み合わせの各々について、監視変量の変動に対応する外乱の印加パターンを同定し原因を推論せねばならない。従って、物理プロセスの診断という作業は、

（１）プロセス内の幾つかの物理量の観測・監視

（２）プロセスの可能な全ての因果構造と外生的変量の組み合わせの導出

（３）各因果構造に対応した可能性のある外乱の種類と強度の同定

という３つの段階に分けられる。（１）は物理プロセスの計測技術の問題なので、ここでは扱わない。また（２）については第２章から第４章にかけて詳細に論じた。図２に示された原子力プラント蒸気発生器の異常診断のための因果構造グラフは、この体系を仮定構造方程式で表し、第４章で述べた方法により導出したものである。第２章で述べた通り、監視変量の異常変位計測情報とこのグラフの知識からだけでも、系に起きた異常の原因について、かなり範囲を限定することが可能である。しかし、この因果構造グラフの知識だけでは、監視変量において観測された異常変位の定量的情報を基に、外乱の定量的強度を推定することはできない。従って、診断にとって残された課題は（３）である。

現在、この課題（３）に関して研究を進めている所であり、その全貌はまだ明らかになっていない。しかしながら、以下のような現代制御理論における可制御性や可観測性の概念の拡張ないし変形の適用を考えている。

下記の正準方程式で与えられる物理プロセスを考える。

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{17}$$

$$y = Cx \tag{18}$$

xは物理プロセス内の状態量ベクトルであり、uはプロセス状態を操作する操作量ベクトルである。yは物理プロセス内で観測されている状態量のベクトルである。また、A、Bはプロセスの物理機構を表す行列であり、Cはプロセスの観測機構を表す行列である。このような形で表されるプロセスに関しては、現代制御理論により以下のような可制御性や可観測性の定義が与えられている。

・可制御性

任意の時刻$t0$に対し任意の初期状態$x(t0)$が、uによる適切な操作により、有限時間$t1 \geqq t0$内に原点$x(t1)=0$に移行され得るならば完全可制御である。

・可観測性

有限時間$t1 \geqq t0$内の$y(t)$の観測により、任意の初期状態$x(t0)$の厳密な値が決定され得るならば完全可観測である。

現代制御理論では、行列Ａ、Ｂ、Ｃがどのような条件を満たす場合に可制御性や可観測性が満たされるかが明らかにされている。

そこで、uをプロセスの外生的変数、xをその他の物理量、yを観測・監視している物理量と置き換えれば類似した議論ができると予想される。ただし、これらの概念は正準方程式で表されるプロセスに関するものであり、可制御性や可観測性の定義からも判るように、時間に依存する因果性に基づく制御や観測にしか適用できない。従って、時間に直接

には依存しない因果性のみが存在し正準方程式では表されない、気体ピストンシリンダのような体系をも含む一般的な場合の、外乱の同定能力や同定方法の定式化には、今後一層の検討が必要である。

しかしながら、このような物理系の境界条件変量や因果構造の自動導出と因果性の定量的取扱いの方法論は、大規模な物理系のシミュレーションや設計、制御、診断等における将来的応用において有用であると思われる。

参考文献

（１） 鷲尾　隆，物理法則の固有因果構造に基づく異常診断知識の導出，第１１回知識・知能システムシンポジウム，平成２年３月１２日・１３日，東京

（２） ヴォルフガング・パウリ，物理と認識，講談社

（３） レネ・デカルト，方法序説，岩波書店

（４） N.Bohr, Atomtheorie und Naturbeschreibung, Kap.III, Berlin 1931

（５） 田中　博，定性推論，第２章　定性推論とオントロジー，共立出版，１９８９

（６） Simon,H.A., MOdels of Discovery, D.Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1977

（７） Iwasaki,Y. and Simon, H.A., Causality in Device Behavior, Artifitial Intelligence, Vol.29, NO.1, pp.3-32, 1986

（８） Iwasaki,Y., Causal Ordering in a Mixed Structure, Proc. of AAAI-88, Vol.1, pp.313-318, 1988

（９） de Kleer,J. and Brown,J.S., A Qualitative Physics Based on Confluences, Artifitial Intelligence, Vol.24, No.1, pp.7-83, 1984

（１０） 鷲尾　隆，物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出，人工知能学会誌，Vol.4, No.4, 1990

（１１） Williams,B.C., Qualitative Analysis of MOS Circuits, Artifitial Intelligence, Vol.24, No.2, pp.281-346, 1984